

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
7. November 2002 (07.11.2002)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 02/088799 A1**

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **G02B 6/12, 6/30**

**FÜR NACHRICHTENTECHNIK BERLIN GMBH**  
[DE/DE]; Einsteinufer 37, 10587 Berlin (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: **PCT/DE02/01557**

(22) Internationales Anmeldedatum:  
25. April 2002 (25.04.2002)

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **HEIDRICH, Helmut** [DE/DE]; Schneeballenweg 18, 12357 Berlin (DE).  
**WEINERT, Carl Michael** [DE/DE]; Troppauer Str. 9, 12205 Berlin (DE).

(25) Einreichungssprache: **Deutsch**

(26) Veröffentlichungssprache: **Deutsch**

(30) Angaben zur Priorität:  
101 23 137.7 30. April 2001 (30.04.2001) **DE**

(81) Bestimmungsstaaten (national): **CA, JP, US.**

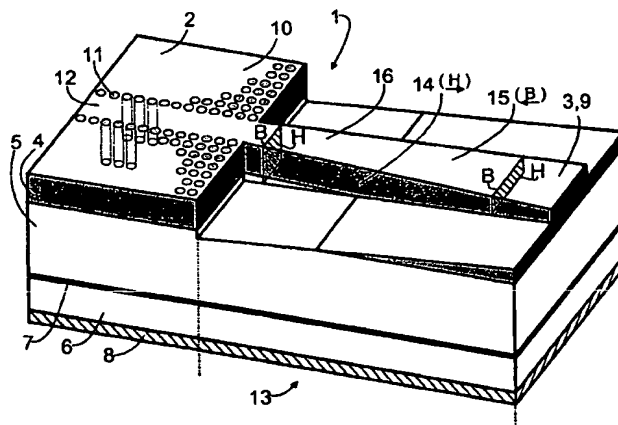
(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **HEINRICH-HERTZ-INSTITUT**

(84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: **INTEGRATED OPTICAL FIELD WIDTH TRANSFORMER FOR ADIABATIC MONOMODAL FIELD MATCHING**

(54) Bezeichnung: **INTEGRIERT-OPTISCHER FELDWIDENTRANSFORMATOR ZUR ADIABATISCHEN, MONOMODAL-GEN FELDANPASSUNG**



(57) Abstract: In integrated optics, cross-sectional changes on connecting wave guides are compensated by means of a field width transformer using an adiabatic field matching. Photonic crystals have a synthetic lattice, the periodic structure of which is matched to the wavelength of the light wave. Integral defective wave guides are produced by interrupting the periodic structure. As a result of the small dimensions thereof, photonic crystals are difficult to handle and may only be coupled to other optical components with difficulty. A defective wave guide (12) may be coupled to an integrated optical wave guide (3), whereby said field width transformer (1) thus has both a vertical tapering (14) and a counter lateral tapering (15) in a taper region (13) of the integrated optical wave guide (3). The ratio of height (H) to width (B) is determined by application of conventional numerical methods, such that monomodality in the wave guide and optimal field overlaps are guaranteed. Said field width transformer may be monolithically integrated with one or several further field transformers of the same or different types to give dual or multiple adapters, such that an optimal and versatile coupling of photonic crystals to various optical components is possible.

(57) Zusammenfassung: In der integrierten Optik werden Querschnittsänderungen bei der Verbindung von Wellenleitern mittels Feldweitentransformatoren durch eine adiabatische Feldanpassung angeglichen. Photonische Kristalle stellen künstliche Gitter dar, deren periodische

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

**BEST AVAILABLE COPY**

**Veröffentlicht:**

- mit internationalem Recherchenbericht
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.*

Strukturen an die Wellenlänge der Lichtwelle angepasst sind. Durch Unterbrechung der periodischen Strukturen werden integrierte Defektwellenleiter erzeugt. Photonische Kristalle sind aufgrund ihrer geringen Abmessungen nur schwer handhabbar und auch nur aufwändig an andere optische Bauelemente ankoppelbar. Zur Kopplung des Defektwellenleiters (12) mit einem integriert-optischen Wellenleiter (3) weist der erfindungsgemäße Feldweitentransformator (1) deshalb in einem Taperbereich (13) sowohl eine vertikale Taperung (14) als auch eine gegenläufige laterale Taperung (15) des integriert-optischen Wellenleiters (3) auf. Dabei ist dessen Verhältnis von Höhe (H) zu Breite (B) unter Anwendung bekannter numerischer Verfahren so bemessen, dass Monomodigkeit im Wellenleiter (3) und optimale Feldüberlappungen gewährleistet sind. Der erfindungsgemäße Feldweitentransformator kann mit einem oder mehreren weiteren Feldtransformatoren gleichen oder verschiedenen Typs zu dualen oder multiplen Adaptern monolithisch integriert werden, sodass eine optimale und vielseitige Kopplung photonischer Kristalle an unterschiedliche optische Bauelemente möglich ist.

## **Integriert-optischer Feldweitentransformator zur adiabatischen, monomodigen Feldanpassung**

### **5 Beschreibung**

Die Erfindung bezieht sich auf einen integriert-optischen Feldweitentransformator zur adiabatischen, monomodigen Feldanpassung zwischen einer optischen Komponente und einer planaren Wellenleiterschaltung zugehörigen integriert-optischen Wellenleiter, der in einem Taperbereich eine kontinuierliche, bis zumindest auf die Pufferschicht zwischen Wellenleiterschicht und Leitschicht verlaufende vertikale Taperung der Wellenleiterhöhe aufweist.

15 In der integrierten Optik treten bei der Verbindung von Wellenleitern Querschnittsänderungen auf. Die sich ausbreitenden Lichtwellen müssen entweder einer aufweitenden oder konzentrierenden Feldweitenänderung unterzogen werden, um abrupte Übergänge mit einer schlechten Koppel-effizienz als Maß für Koppelverluste zu vermeiden. Ziel ist eine adiabatische Feldanpassung, bei der die geführte Lichtleistung in einer Mode erhalten bleibt.

Photonische Kristalle stellen künstliche zweidimensionale Gitter dar, deren periodische Strukturen an die Wellenlänge der Lichtwelle angepasst sind. Durch eine Ausbildung von periodischen Lochanordnungen (oder auch Säulen-anordnungen) im lichtführenden Halbleitermaterial bis hinein in die darunter liegende Pufferschicht können unterschiedliche resultierende Brechungsindizes erzeugt werden. So können Bandlücken hervorgerufen werden, in denen Energiezuständen bzw. Frequenzen sich die Lichtwelle nicht ausbreiten kann („verbotene Zone“). Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, durch örtliche Veränderung des Brechungsindex in einem photonischen Kristall einen Wellenleiter als „erlaubtes Gebiet“ mit für die Lichtwellen möglichen Energiezuständen bzw. Frequenzen zu erzeugen, in dem das Licht auch bei

scharfen Richtungsänderungen sicher geführt wird. Während bei herkömmlichen Lichtwellenleitern hier aufgrund der Brechungsgesetze Transmissionen auftreten können, kann die Lichtwelle im Defektwellenleiter diesen aufgrund ihres Energiezustandes nicht verlassen. Eine Möglichkeit der Erzeugung ist das Vorsehen von Bereichen ohne Tiefenätzung, sodass in diesem Bereich das „Ausbreitungsverbot“ für die Wellen aufgehoben wird. In diesem Falle spricht man von einem „Defektwellenleiter“. Derartige Defektwellenleiter auf der Basis von photonischen Kristallen zeichnen sich durch eine starke optische Einschnürung aus. Durch diese Eigenschaft können extrem kleine optische Bauelemente mit Flächen von einigen  $10 \mu\text{m}^2$  realisiert werden. Diese kleinen Bauelemente, bei denen der Durchmesser des Defektwellenleiters in einem Bereich von  $1 \mu\text{m}$  liegt, lassen sich allerdings praktisch nicht als Einzelbauelemente nutzen. Außerdem ist das Problem der optischen Kopplung an weitere optische Komponenten, das bei einem Felddurchmesser einer optischen Glasfaser im Bereich von  $12 \mu\text{m}$  sehr groß ist, bislang nicht gelöst. Zu beiden Problemen gibt es im Stand der Technik erste Lösungsansätze.

Neben der allgemein bekannten Möglichkeit, photonische Kristalle mit einer Kantenlänge von unter  $100 \mu\text{m}$  in ein Trägermaterial einzugießen und durch Schleifen und Polieren bis auf die Stirnflächen freizulegen, ist es aus dem **Aufsatz [I]** „Low-loss channel waveguides with two-dimensional photonic crystal boundaries“ (C.J. Smith et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 77, No. 18, Oct. 2000, pp. 2813-2815) bekannt, über einen Schichtwellenleiter ohne laterale Feldführung zu koppeln. In beiden Fällen werden jedoch nur einige Prozent Koppeffizienz erreicht, die für praktische Anwendungen unakzeptabel sind.

Zur Ankopplung des photonischen Kristalls an seine Umwelt unter Verwendung des Prinzips der einfachen Transformation des optischen Feldes sind mehrere Ansätze veröffentlicht. Aus dem **Aufsatz [II]** "Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis" (A. Yariv et al., Opt. Lett., Vol. 24, No. 11, June 1999, pp. 711-713) und dem **Aufsatz [III]** "Propagation and second-harmonic generation of electromagnetic waves in a coupled-resonator optical

waveguide" (Y. Xu et al., J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 17, No. 3, March 2000, pp. 387-400) ist es bekannt, die Gitterabstände des photonischen Kristalls zu ändern. Die Integration eines Feldweitentransformators direkt in das Material des photonischen Kristalls, dessen Herstellung einen sehr zeitaufwändigen Lithographie-Schreibprozess und eine hochgenaue Strukturierung im Nanobereich erfordert, ist jedoch unter wirtschaftlichen Aspekten nicht zufriedenstellend. Zur adiabatischen Transformation des Feldes durch laterale Änderung der Translations-Symmetrie wird in dem **Aufsatz [IV]** „Adiabatic coupling between conventional dielectric waveguides and waveguides with discrete translational symmetry" (Y. Xu et al., Opt. Lett. 25, Vol. 25, No. 10, May 2000, pp. 755-757) eine Ein-/Auskopplung über einen Schichtwellenleiter außerhalb des photonischen Kristalls, der in Form von einzelnen Säulen ausgebildet ist, beschrieben. Dieser Typ eines photonischen Kristalls ist jedoch aus Stabilitätsgründen weniger interessant als ein photonischer Kristall, der auf der Ausbildung von Löchern beruht. Die für die beschriebene Ankopplung erforderlichen Wellenleiter müssen darüber hinaus so dünn sein, dass die laterale Ausbildung einer Spitze nur sehr schwer herstellbar ist. Ein photonischer Kristall mit Säulenausbildung ist ebenfalls aus dem **Aufsatz [V]** „Photonic crystal waveguides: Out-of-plane losses and adiabatic modal conversion" (M. Palamaru et al., Appl. Phys. Lett. 78, Vol. 78, No. 11, March 2001, pp. 1466-1486) bekannt. Der Wellenleiter wird durch Wegfall mehrerer Säulenreihen erzeugt. Er ist zusätzlich mit Löchern versehen, um seinen Brechungsindex zu ändern. Die Lichtwelle strebt immer in Gebiete mit höherem Brechungsindex. Es wird eine adiabatische Transformation des Feldes durch Verkleinerung des Lochdurchmessers des Defekt-Wellenleiters an dessen Ende in einem Taperbereich beschrieben. In der Richtung der Verkleinerung werden im Taperbereich auch die Säulen verkleinert, um den Ein-/Auskopplungseffekt zu unterstützen. Löcher und Säulen zeigen im Taperbereich eine abnehmende Tiefe. Auch hier gilt, dass die Integration des Feldtransformators in das Material des photonischen Kristalls unter wirtschaftlichen Aspekten bedenklich ist. Außerdem ist eine definierte, hochgenaue Modifikation der Ätztiefe in den extrem kleinen Strukturen

technologisch sehr schwer realisierbar. Darüber hinaus ist der Taperbereich äußerst empfindlich gegenüber mechanischen Störeinflüssen.

Die Integration eines Feldweitentransformators in den photonischen Kristall ist  
5 also einerseits herstellungstechnisch ungünstig, andererseits erlaubt sie keine  
bessere Handhabbarkeit des photonischen Kristalls, der durch die integrierte  
Taperung sehr zerstörungsempfindlich ist. Wesentlich einfacher in der  
Herstellung und unempfindlicher in der Handhabung sind Feldweitentrans-  
formatoren, die als eigenes optisches Bauelement in eine planare  
10 Wellenleiterschaltung monolithisch integriert sind. Die integrierte Kombination  
hat dann eine gut handhabbare Größe und ist weitgehend unempfindlich  
gegen mechanische Störeinflüsse. Eine solche integrierte Kombination ist  
beispielsweise aus dem **Paper [VI]** „Monolithic Integration of Lasers,  
Photodiodes, Waveguides and Spot Size Converters on GaInAsP/InP for  
15 Photonic IC Applications“ (M. Hamacher et al., IRPM2000, May 2000, USA,  
paper MA1.3, p21.24). Bei dem hier beschriebenen „Spotgrößenkonverter“  
handelt es sich um einen polarisationsunabhängigen Feldweitentransformator  
in der Ausbildung als Rippenwellenleiter als Schnittstelle zwischen der  
planaren Wellenleiterschaltung („optischer Chip“) und einer Glasfaser. Dazu  
20 weist der Rippenwellenleiter eine laterale Taperung auf, die von dem integriert-  
optischen Wellenleiter auf dem Chip zur Glasfaser hin verläuft. Dadurch wird  
die Feldführung in der Wellenleiterschicht kontinuierlich erniedrigt, sodass die  
geführte Lichtwelle nach unten in Richtung auf das Substrat abdriiftet. Ein  
seitliches Auseinanderdriften der Welle wird durch eine konstante Fokussie-  
25 rungsrippe („äußere Rippe“) abgefangen.

Der Stand der Technik, von dem die vorliegende Erfindung ausgeht, wird in der  
**EP0890121** offenbart. Es wird ein optischer Feldweitentransformator zur  
adiabatischen, monomodigen Feldanpassung beschrieben, der für eine  
30 Ankopplung einer Glasfaser als optischer Komponente an einen integriert-  
optischen Wellenleiter einer planaren Wellenleiterschaltung in Form einer  
photonischen integrierten Schaltung ausgebildet ist. Der Feldweiten-

transformator, der als eigenständiges Bauelement mit der Schaltung monolithisch integriert ist, weist einen Rippenwellenleiter auf, der in einem Taperbereich mit einer vertikale Taperung der Rippenhöhe versehen ist. Diese kann mit sich ändernder Neigung ausgeführt sein und verläuft bis auf die unterhab der Wellenleiterschicht liegende Pufferschicht. Diese ist im Taperbereich konstant verschmälert und bildet eine konstante Fokussierungsrippe für die zu führende Lichtwelle. Auch bei der vertikalen Taperung wird die Feldführung im Rippenbereich kontinuierlich erniedrigt und die Lichtwelle nach unten abgedrängt und von der Fokussierungsrippe seitlich abgefangen. Dabei wird auch das Ausbreitungsbild des optischen Feldes angepasst, sodass der bekannte Feldweitentransformator polarisationsunabhängig ist. Die mit dem bekannten Feldweitentransformator zu koppelnden Komponenten weisen ein solches Größenverhältnis auf, dass durch eine einfache Taperung eine adiabatische, monomodige Feldanpassung herbeigeführt werden kann. Zur Kopplung mit einer anderen optischen Komponente mit gegenüber den herkömmlichen Komponenten erheblich verringerten Abmessungen ist der bekannte Feldweitentransformator jedoch nicht geeignet.

**Aufgabe** für die vorliegende Erfindung ist es daher, einen Feldweitentransformator der eingangs beschriebenen gattungsgemäßen Art so auszubilden, dass er zur Feldanpassung zwischen einem integriert-optischen Wellenleiter und einer optischen Komponente geeignet ist, deren Abmessungen erheblich geringer als die des integriert-optischen Wellenleiters sind. Dabei sollen die guten Gebrauchseigenschaften des bekannten Feldweitentransformators für größere Komponentenabmessungen erhalten bleiben.

Die erfindungsgemäße **Lösung** für diese Aufgabe für einen integriert-optischen Feldweitentransformator der zur adiabatischen, monomodigen Feldanpassung zwischen einer optischen Komponente und einem einer planaren Wellenleiterschaltung zugehörigen integriert-optischen Wellenleiter besteht deshalb darin, dass die optische Komponente ein photonischer Kristall mit zumindest einem in einer periodischen Lochanordnung erzeugten

- Defektwellenleiter ist, von dem sich die vertikale Taperung in Richtung auf den integriert-optischen Wellenleiter erstreckt, und dass der integriert-optische Wellenleiter eine zur vertikalen Taperung der Wellenleiterhöhe kontinuierlich gegenläufige laterale Taperung der Wellenleiterbreite aufweist, wobei beide
- 5 Taperungen in ihrem Verhältnis von Höhe zu Breite unter Anwendung eines zweidimensionalen numerischen Verfahrens zur Eigenmodenberechnung für eine Erzielung von Monomodigkeit im gesamten Taperbereich dimensioniert sind.
- 10 Der erfindungsgemäße Feldweitentransformator als bidirektionale optische Komponente ist mit dem photonischen Kristall monolithisch integriert. Dadurch ist sicher gestellt, dass durch Verbleiben des optischen Feldes in dem Material mit dem höheren Brechungsindex eine Divergenz des optischen Feldes mit hoher numerischer Apertur vermieden wird, wie sie an einfachen Stoß-
- 15 kopplungsstellen auftritt. Durch das hochbrechende Halbleitermaterial wird über eine starke Einschnürung die gute Feldweitenanpassung erreicht. Der Feldweitentransformator weist in seinem Taperbereich eine doppelte, gegenläufige Taperung auf. Ausgehend vom integriert-optischen Wellenleiter wird der lichtführende Wellenleiter im Feldweitentransformator in Richtung auf den
- 20 Defektwellenleiter immer schmaler und zugleich immer höher. Dabei legen die Querschnittsabmessungen von dem integriert-optischen Wellenleiter auf der einen Seite und dem Defektwellenleiter auf der anderen Seite Anfangs- und Endquerschnitt des Wellenleiters im Feldweitentransformator in erster Näherung fest. Zwischen seinen beiden Enden erfolgt eine kontinuierliche
- 25 Querschnittsüberführung zur adiabatischen Anpassung der beiden optischen Felder. Die Hauptkriterien für den Änderungsverlauf sind jedoch die Übereinstimmung der Feldschwerpunkte und die Aufrechterhaltung der Monomodigkeit im Wellenleiter, um Abstrahlverluste bei der Feldanpassung zu vermeiden und um eine hohe Koppel-effizienz zu erreichen. Der Feldschwerpunkt bezeichnet
- 30 den Mittelpunkt des Ausbreitungsfeldes, dessen Lage in der Wellenleiterschicht von deren Materialzusammensetzung abhängig ist. Erst, wenn die Feldschwerpunkte der zu koppelnden Ausbreitungsfelder zumindest vertikal



übereinstimmen, kann eine möglichst große Feldüberlappung erreicht werden. Zur Ermittlung der Schwerpunkte und zur Berechnung der Eigenmoden einer Lichtwelle in Abhängigkeit von den Höhen- und Breitenabmessungen des Wellenleiters existieren eine Reihe von kommerziell erhältlichen, computer-  
5 unterstützten Rechenvorschriften, die gut erprobt sind und einfach angewendet werden können.

Mit dem erfindungsgemäßen Feldweitentransformator können bei einer guten Justage der beiden Wellenleiter im Herstellungsprozess zueinander effiziente  
10 Kopplungen durch adiabatische Feldanpassung in einer Mode mit Verlusten von unter -1dB erreicht werden. Gegenüber den weiter oben erwähnten, auf dem Gebiet der photonischen Kristalle bekannten Lösungsansätzen für eine Kopplung ist hier also eine bedeutende Leistungssteigerung zu erkennen. Gegenüber den bekannten Lösungsansätzen für eine adiabatische Feldan-  
15 passung weist der erfindungsgemäße Feldweitentransformator wesentliche bessere Gebrauchseigenschaften auf, da er über eine große mechanische Stabilität verfügt. Zudem ist er auch wesentlich einfacher herstellbar. Weiterhin werden durch die monolithische Integration des erfindungsgemäßen Feldweitentransformators mit dem photonischen Kristall Abmessungen in  
20 einem Bereich geschaffen, die überhaupt erst eine einfache Handhabung derartig kleiner optischer Komponenten ermöglichen.

Defekt-Wellenleiter in photonischen Kristallen sind sehr schmal (z.B.  $0,7 \mu\text{m}$ ) und relativ hoch (z.B.  $1,2 \mu\text{m}$ ). Wesentlich für die effiziente Feldanpassung bei  
25 dem erfindungsgemäßen Feldweitentransformator ist die gute Übereinstimmung der beiden Feldschwerpunkte, das heißt eine gute Feldüberlappung. Diese kann aber bei den Defekt-Wellenleitern, die sich durch Tiefenätzung der Lochanordnung bis hinunter in die Pufferschicht erstrecken, in Abhängigkeit von der Materialzusammensetzung gegebenenfalls nicht allein durch Abtragen  
30 der Wellenleiterschicht im Taperbereich erreicht werden. Bei einer Fortführung des erfindungsgemäßen Feldweitentransformators ist deshalb vorgesehen, dass die vertikale Taperung der Wellenleiterhöhe bis in die Pufferschicht

hineinreicht. Die gute Feldanpassung zum Defekt-Wellenleiter des photo-  
nischen Kristalls wird dann über die starke Einschnürung im hochbrechenden  
Halbleitermaterial erzielt, indem die vertikale Taperung der lichtführenden  
Wellenleiterschicht durch dieses Material hindurch nach unten kontinuierlich  
5 bis in die niedrigbrechende optische Pufferschicht erfolgt.

Bei der Herstellung von optischen Bauelementen ist insbesondere auch auf  
deren Größenabmessungen zu achten, die bei der monolithischen Integration  
in Halbleitermaterialien auch aus Kostengründen möglichst gering, aber noch  
10 handhabbar sein sollen. Wenn gemäß einer nächsten Erfindungsausge-  
staltung die vertikale und die laterale Taperung des integriert-optischen  
Wellenleiters mit sich ändernden Neigungen verlaufen, kann die Länge des  
Taperbereichs auf das unbedingt notwendige Mindestmaß reduziert werden.  
Auch wird eine Verbesserung bei der Verlagerung des senkrechten  
15 Ausbreitungsbildes erzielt. Dabei können die beiden Taperungen grundsätzlich  
mit unterschiedlichen Neigungen oder im Falle von linearen Taperungen mit  
unterschiedlichen Schrägungen verlaufen.

Die vorliegende Erfindung basiert auf der gegenläufigen doppelten Taperung  
20 („Verjüngung“) der lichtführenden Wellenleiterschicht. Hierbei kann es sich  
beispielsweise um einen vergrabenen Wellenleiter handeln, der seitlich isoliert  
ist und zu seiner Umgebung einen hohen Brechzahlkontrast aufweist. Gemäß  
einer weiteren Erfindungsausgestaltung kann auch vorgesehen sein, dass der  
integriert-optische Wellenleiter ein Rippenwellenleiter ist, der die vertikale und  
25 laterale Taperung im Bereich seiner Rippe aufweist. Gegenüber der Horizontal-  
strukturierung bei einem vergrabenen Wellenleiter sind Rippenwellenleiter mit  
einer Vertikalstrukturierung durch einfache Maskentechnik mit Tiefenätzung  
einfacher herzustellen. Die gegenläufige Taperung bei dem erfindungs-  
gemäßen Feldweitentransformator kann dann herstellungstechnisch relativ  
30 einfach durch die entsprechende geometrische Ausbildung der Rippe des  
Rippenwellenleiters realisiert werden.

Wie bereits weiter oben ausgeführt, wird ein photonischer Kristall erst durch die monolithische Integration mit dem erfindungsgemäßen Feldweitentransformator relativ einfach handhabbar. Auch werden unterschiedliche Anbindungen der photonischen Bauelementeinseln mit Justagetoleranzen im Submikrometerbereich an andere optische Komponenten möglich. Dafür ist es gemäß einer nächsten Ausgestaltung des Feldweitentransformators nach der Erfindung besonders vorteilhaft, wenn der integriert-optische Wellenleiter mit zumindest einem weiteren integriert-optischen Wellenleiter eines weiteren Feldweitentransformators monolithisch integriert verbunden ist. Durch diese konstruktive Ausgestaltung wird ein optischer Adapter mit zwei oder mehr Schnittstellen geschaffen, die intern über den integriert-optischen Wellenleiter, bei dem es sich insbesondere um einen Rippenwellenleiter handeln kann, verbunden. Die erste Schnittstelle ist immer mit dem Defektwellenleiter des photonischen Kristalls verbunden, die anderen Schnittstelle in den weiteren Feldweitentransformatoren sind jedoch frei verfügbar. Diese können zur Ankopplung an verschiedene Komponenten unterschiedlich gestaltet sein. Insbesondere kann nach einer nächsten Erfindungsfortführung vorgesehen sein, dass der zumindest eine weitere Feldweitentransformator zur Feldanpassung an einen weiteren Defektwellenleiter in einem photonischen Kristall ausgebildet ist. Der weitere Feldweitentransformator hat dann einen zu dem ersten Feldweitentransformator identischen Aufbau. In der Ausgestaltung als multipler optischer Adapter können dann komplette Netzwerke zur optischen Vernetzung einer Vielzahl von optischen Kristallen in monolithisch integrierter Bauform auf einem gemeinsamen optischen Chip hergestellt werden.

Des Weiteren kann gemäß einer anderen Erfindungsausgestaltung auch vorgesehen sein, dass der zumindest eine weitere Feldweitentransformator zur Feldanpassung an eine monomodige optische Glasfaser ausgebildet ist. Damit ist eine Ankopplung der photonischen Bauelementeinseln über eine oder mehrere Glasfasern an eine Umwelt außerhalb des monolithisch integrierten Chips möglich. Der weitere Feldweitentransformator kann dabei insbesondere

wie in der EP 0890121 offenbart mit einer TM-Fokussierungsrippe ausgebildet sein. Der Adapter hat nunmehr keinen symmetrischen Aufbau mehr, sondern zeigt unterschiedliche Schnittstellenausbildungen. Der diese verbindende integriert-optische Wellenleiter im Adapter zeigt zunächst vom Defektwellenleiter kommend eine flacher werdende Verbreiterung, die dann wieder in eine höherwerdende Verschmälerung übergeht. In der Mitte zwischen den Schnittstellen hat der integriert-optische Wellenleiter dabei einen Querschnitt, den an das optische Feld eines photonischen Schaltkreises (PIC) angepasst ist. Dieser kann auch das anzukoppelnde weitere optische Bauelement sein, wenn gemäß einer nächsten Erfindungsweiterbildung der zumindest eine weitere Feldweitentransformator zur Feldanpassung an einen photonischen Schaltkreis ausgebildet ist. Mittels eines solchen Adapters können dann komplette optische Schaltungen in einer gemeinsamen optischen Integration hergestellt werden.

Sinnvoll ist die beschriebene Zusammenführung insbesondere, wenn alle beteiligten Komponenten einen ähnlichen Schichtaufbau aufweisen und daher gleichzeitig prozessiert werden können. Außerdem müssen sie alle monomodig arbeiten. Es kann sich dabei beispielsweise um den Anschluss eines oder mehrerer Laser oder um Wellenleiterzuführungen zu einer oder mehreren Photodioden handeln. Bei besonders aufwändig herzustellenden optischen Komponenten, die einen komplexen Schichtenaufbau aufweisen oder multimodig ausgelegt sind, ist eine Ausbildung des Feldweitentransformators nach der Erfindung vorteilhaft, bei der der integriert-optische Wellenleiter eine Schnittstelle zur Stoßkopplung mit einer weiteren optischen Komponente, insbesondere eines optischen Boards, aufweist. Eine Stoßkopplung hat zwar eine gegenüber integrierten Kopplungen geringere Koppeleffizienz, lässt dafür aber auch unterschiedliche Materialkombinationen zu, beispielsweise zwischen den kostspieligen Verbindungshalbleitern mit den preiswerteren Silicon-, Silica- oder Polymermaterialien. Da die Fläche des verwendeten Halbleitermaterials durch die notwendigen vielen Prozessschritte zur Herstellung von integrierten Schaltungen mit opto-elektronischen Elementen (OEIC) wie Lasern und

Photodetektoren „wertvoll“ ist, und diese Prozessschritte unter Umständen nicht mit dem Prozessschritten zur Herstellung des optischen Schaltungsnetzwerks identisch sind, kann eine planar-hybride Integration in vielen Fällen wirtschaftlich günstiger sein als eine völlig monolithische Lösung. Die OEICs, die ultrakompakte photonische-Kristall-Bauelemente mit den Tapern der vorliegenden Erfindung enthalten, die als diskrete Chips gar nicht mehr mechanisch zu greifen wären, werden dann mit ihrer Oberseite nach unten („up-side-down“) in Flip-Chip-Technik in mechanische Führungen auf dem optischen Board eingelegt, erforderlichenfalls beim elektrischen Kontaktieren aktiv an die integriert-optischen Wellenleiter justiert und bis zum Ende der Ausbildung der Flip-Chip-Verbindung mechanisch fixiert. Diese Technologie kann man analog zur mikroelektronischen Multi-Chip-Modultechnik sehen, bei der auch bestimmte Funktionen in einem Chip monolithisch untergebracht werden und diese Chips dann auf einem Trägerchip („mother board“) eine planar-hybrid-integrierte Einheit bilden, an die dann Außenwelt angekoppelt wird.

Zwischen den beiden anzupassenden Wellenleitern im erfindungsgemäßen Feldweitentransformator muss bei der Dimensionierung des Taperbereichs die Bedingung der Monomodigkeit erfüllt sein. Bei einer Verwendung von Wellenleiternetzwerken unter Nutzung von interferometrischen Effekten (z.B. genutzt in Richtkopplern oder Multimode-Interferenz-Kopplern) ist eine monomodige Auslegung erforderlich. Beispielsweise für die Zuführungswellenleiter zu Photodioden kann jedoch gemäß einer nächsten Ausgestaltung des Feldweitentransformators nach der Erfindung vorteilhaft vorgesehen sein, dass der integriert-optische Wellenleiter im Anschluss an den Taperbereich einen Auslaufbereich aufweist, in dem bei der geometrischen Dimensionierung die Bedingung der Monomodigkeit aufgegeben und Multimodigkeit zugelassen ist. Durch eine derartige Ausgestaltung erlangt der erfindungsgemäße Feldweitenweitentransformator eine besondere Einsatzflexibilität, die durch die unterschiedlichen Adapterausführungen ohnehin bereits sehr groß ist.

Photonische Kristalle können auch mehrere parallele Defektwellenleiter oder verzweigte Defektwellenleiter aufweisen. Nach einer anderen Erfindungsgestaltung der Erfindung ist es deshalb vorteilhaft, wenn der Feldtransformator nach der Erfindung mit weiteren Feldtransformatoren gleicher Bauart parallel an verschiedene Defektwellenleiter eines photonischen Kristalls monolithisch integriert angekoppelt ist. So ist jeder Defektwellenleiter mit einem eigenen Feldweitentransformator nach der Erfindung monolithisch integriert. Die Verzweigung kann leistungsabhängig oder wellenlängenselektiv über eine entsprechende Weiche (oder Vereiniger) erfolgen. An die einzelnen Defektwellenleiter können dann über integriert-optische Wellenleiter verschiedene monolithisch integrierte optoelektronische Bauelemente (beispielsweise Laser- oder Photodioden) angekoppelt sein.

Je nach Anwendungsfall können der erfindungsgemäße Feldweitentransformator oder seine Ausbildungsformen in unterschiedlichen Schichtaufbauten realisiert sein. Nach einer nächsten Erfindungsfortführung kann zum einen vorgesehen sein, dass der monolithisch integrierte Schichtaufbau in einem höherbrechenden, insbesondere quaternären, III-V- Halbleiter-Verbindungsmaterial als Wellenleiterschicht und einem dazu niederbrechenden, insbesondere binärem, III-V-Halbleiter-Verbindungsmaterial als optische Begrenzungsschicht ausgebildet ist. Eine übliche Materialpaarung ist beispielsweise GaInAsP mit einer Vakuumwellenlänge von  $1,3\ \mu\text{m}$  und InP. Zum anderen kann aber auch bei der Erfindung vorteilhaft vorgesehen sein, dass der monolithisch integrierte Schichtaufbau in einem höherbrechenden Halbleitermaterial, insbesondere Silizium, als Wellenleiterschicht und einem dazu niederbrechenden Halbleitermaterial, insbesondere  $\text{SiO}_x$ , als optische Begrenzungsschicht ausgebildet ist. Dadurch kann beispielsweise eine Ankopplung an einen weiteren PIC aus einem siliziumbasierten Halbleitermaterial (Silicon-on-Isolator SOI), der als optisches Board zur Aufnahme von III/V-PICs oder -OEICs dient, realisiert werden. Auf dem optischen Board wird dann die Verbindung zur Glasfaserwelt sowie die optische Vernetzungsschaltung auf einem preiswerten Materialsystem ausgeführt. In den OEICs

können dann in einem adäquaten Materialsystem die Laser- und Detektorfunktionen monolithisch integriert mit photonischen-Kristall-Bauelementen realisiert sein.

- 5 Der erfindungsgemäße Feldweitentransformator ist aufgrund seines kompakten Aufbaus relativ einfach herstellbar. Insbesondere kann die vertikale Taperung der Höhe des integriert-optischen Wellenleiters mittels Übertragung einer vertikal getaperten Lackrampe erzeugt werden. Epitaktische (einkristalline) Aufwachsungsverfahren zur Herstellung sowohl von lateralen
- 10 Taperungen (Belichtung durch ortsfeste Lackmaske) als auch von vertikalen Taperungen (Belichtung durch ortsveränderliche Lackmaske, vergleiche EP0973188) für Feldweitentransformatoren sind an sich bekannt. Bei dem doppelt getaperten Feldweitentransformator nach der Erfindung, beispielsweise in der Ausbildung mit einem Rippenwellenleiter, werden beide bekannte
- 15 Verfahren miteinander kombiniert. Zunächst erfolgt ein epitaktischer Schichtaufbau des Ausgangsmaterials. Dann wird die Halbleiterrippe mit einer ersten Maske (z. B. aus  $\text{SiN}_x$ -Material) mit lateraler Taperung definiert und in einem Trockenätzschritt ausgebildet. Zur Ausbildung der vertikalen Taperung wird dann mittels einer während der photolithographischen Belichtung der
- 20 Photolackschicht verschieblichen zweiten Maske der Photolack unterschiedlich lange belichtet, was zu einer Ausbildung einer vertikalen Lackrampe nach der Entwicklung führt. Durch einen weiteren Trockenätzschritt wird dann die vertikale Lacktaperung auf den bereits lateral getaperten Rippenwellenleiter bis gegebenenfalls in die Pufferschicht übertragen, sodass dieser nun die
- 25 angestrebte doppelte Taperung in den gewünschten Abmessungen aufweist.

**Ausbildungsformen der Erfindung** werden nachfolgend anhand der schematischen Figuren, die zur besseren Anschauung in teilweise stark

30 verzerrter Skalierung dargestellt sind, näher erläutert. Dabei zeigt :

- Figur 1** eine räumliche Ansicht des erfindungsgemäßen Feldweiten-  
transformators,
- Figur 2** ein Diagramm zur Feldanpassung durch die doppelte Tape-  
rung des Feldweitentransformators,
- 5 **Figur 3** einen dualen Adapter zur Kopplung eines Defektwellenleiters  
mit einer Glasfaser,
- Figur 4** einen weiteren dualen Adapter zur Kopplung eines Defekt-  
wellenleiters mit einer Glasfaser,
- Figur 5** einen multiplen Adapter zur Herstellung eines Netzwerks aus  
10 photonischen Kristallen,
- Figur 6** eine parallele Anbindung eines photonischen Kristalls an  
verschiedene optoelektronische Bauelemente,
- Figur 7** eine leistungsabhängige Anbindung eines photonischen  
Kristalls an verschiedene optoelektronische Bauelemente und
- 15 **Figur 8** eine wellenlängenabhängige Anbindung eines photonischen  
Kristalls an verschiedene optoelektronische Bauelemente.

Die **Figur 1** zeigt einen integriert-optischen Feldweitentransformator **1** zur  
20 adiabatischen, monomodigen Feldanpassung zwischen einem photonischen  
Kristall **2** und einem integriert-optischen Wellenleiter **3**, die beide in einer  
Wellenleiterschicht **4** monolithisch ausgebildet sind. Unterhalb der Wellenleiter-  
schicht **4** schließt sich ein Schichtenaufbau aus zumindest zwei Puffer-  
schichten **5**, **6** und einer Leitschicht **7** auf einem Substrat **8** an. Der  
25 Wellenleiter **3** ist im gewählten Ausführungsbeispiel als Rippenwellenleiter **9**  
ausgebildet. Der photonische Kristall **2** als Bauelementeinsel mit Größen-  
abmessungen im Submikrometerbereich weist eine periodische Lochan-  
ordnung **10** auf. Durch die bohrungsartigen Tiefenätzungen **11**, die sich bis in  
die obere Pufferschicht **5** erstrecken, wird in diesem Bereich der resultierende  
30 Brechungsindex so verändert, dass eine Bandlücke für die Lichtwelle entsteht.



Diese kann sich nur in einem Defektwellenleiter **12** ausbreiten, der durch Wegfall der Tiefenätzung strukturiert ist.

Der Feldweitentransformator **1** weist einen Taperbereich **13** auf, in dem der  
5 Rippenwellenleiter **9** doppelt getapert ist. Zum einen erstreckt sich eine vertikale Taperung **14** der Höhe **H** der Rippe **16** vom Defektwellenleiter **12** in Richtung auf den Rippenwellenleiter **9**. Zum anderen läuft der vertikalen Taperung **14** eine laterale Taperung **15** der Breite **B** der Rippe **16** entgegen (in Figur 1 durch entsprechende Pfeile angedeutet). Durch die doppelte,  
10 gegenläufige Taperung wird die Rippe **16** des Rippenwellenleiters **9** in Richtung auf den photonischen Kristall **2** immer schmaler und höher. Dabei ist der Querschnittsverlauf von zwei Kriterien abhängig. Zunächst muss im gesamten Taperbereich **13** Monomodigkeit gewährleistet sein (vergleiche Figur 2). Außerdem muss zur Erzeugung einer möglichst großen Feldüberlappung  
15 eine zumindest vertikale Ausrichtung der Schwerpunkte der optischen Felder von Defektwellenleiter **12** und Rippenwellenleiter **9** erreicht werden (vergleiche Figur 3). Dazu kann es in Abhängigkeit von der Effektivität der gewählten Halbleitermaterialkombination erforderlich sein, die vertikale Taperung **14** bis in die obere Pufferschicht **5** laufen zu lassen (im gewählten Ausführungsbeispiel  
20 in Figur 1 dargestellt). Dadurch ist die Höhe **H** als Maß der vertikalen Taperung **14** ein durch kontrollierte Tiefenätzung einstellbarer Parameter für die Feldüberlappung und damit für die zu erreichende Koppeffizienz von unter -1 dB des Feldweitentransformators **1** nach der Erfindung.

25 In der **Figur 2** ist ein Diagramm zur Ermittlung des richtigen Verhältnisses Höhe **H** zu Breite **B** der lichtführenden Wellenleiterschicht **4**, im gewählten Ausführungsbeispiel der Rippe **16** des Rippenwellenleiters **9**, dargestellt. Das hexagonale Lochmuster hat einen Lochabstand (Gitterkonstante) von 0,4 µm. Dies entspricht einem Materialfüllfaktor von 0,6. Die optische Feldbreite beträgt  
30 0,6 µm. Zur Verdeutlichung sind die entsprechenden Rippenquerschnitte im Taperbereich **13** zugeordnet. Die Simulation wurde mit einem anmelder-

eigenen Rechenprogramm erstellt (die gleiche Simulation kann beispielsweise mit dem kommerziell erhältlichen Programm „FullWAVE“ der Firma RSOFTE durchgeführt werden), das eine zweidimensionale Methode der finiten Differenzen für **TE**- und **TM**-Moden anbietet. Es werden in Abhängigkeit von der Höhe **H** der Rippe **16** und deren Breite **B** getrennt für die **TE**-Mode und die **TM**-Mode die Ausbreitungsfelder berechnet. Dargestellt ist das **TE**-Moden-Ausbreitungsbild für eine quaternäre Wellenleiterschicht **4** mit einer der Energielücke äquivalenten Vakuumwellenlänge von  $1,3\ \mu\text{m}$  (Q- $1,3\ \mu\text{m}$  GaInAsP) auf einer binären Pufferschicht **5** (InP). Bei der Berechnung werden die Abmessungen so gewählt, dass keine Nebenmoden in der Rippe **16** auftreten und maximale Feldüberlappungen an Anfang und Ende des Taperbereichs **13** erreicht werden. Am Übergang zum photonischen Kristall **2** hat die Rippe **16** eine Höhe **H**, die bis in die Pufferschicht **5** hineinreicht. Im Diagramm ist auch zu erkennen, dass der Zusammenhang zwischen Höhe **H** und Breite **B** in einem großen Abschnitt linear ist.

In der **Figur 3** ist ein dualer Adapter **20** dargestellt, der zur Ankopplung des Defektwellenleiters **12** mit einer optischen Glasfaser **21** dient. Mit dem Feldweitentransformator **1** zur Kopplung des Defektwellenleiters **12** mit dem Rippenwellenleiter **9** ist ein weiterer Feldtransformator **22** monolithisch integriert, der der Kopplung eines Rippenwellenleiters **23** mit der Glasfaser **21** dient. Ein solcher Feldweitentransformator **22** ist aus der EP 0890121 bekannt und weist eine vertikale Taperung mit veränderlicher Neigung auf. Die **Figur 4**, zeigt ebenfalls einen dualen Adapter **30** zur Ankopplung an eine optische Glasfaser **31** mit einem ähnlichen weiteren Feldweitentransformator **32**, der aus dem oben zitierten Paper [VI] bekannt ist und in seinem Rippenwellenleiter **33** ausschließlich eine laterale Taperung aufweist. der bekannte Feldweitentransformator **32** dient der Aufweitung des optisches Feldes eines typischen GaInAsP/InP-Chipwellenleiters für die Wellenlänge von  $1,5\ \mu\text{m}$  (z.B. Rippenbreite:  $2\ \mu\text{m}$ ; Rippen- und Schichtmaterial: GaInAsP-Material mit einer der Energielücke äquivalenten Vakuumwellenlänge von  $1,3\ \mu\text{m}$  (kurz: Q- $1,3$ ); Q-

1,3-Dicke: 1  $\mu\text{m}$ ; Rippenhöhe: 0,3  $\mu\text{m}$ ; Q-1,3-Leitschicht unterhalb des Rippenwellenleiters) auf das optische Feld einer Standard-Einmodenglasfaser. Der monolithisch integrierte photonische Kristall 2 nutzt die gleiche Q-1,3-Schicht zur Erzeugung der Vertikalführung. Die Wirkung der beiden  
5 Feldweitentransformatoren 22, 32 ist identisch, bei beiden wird die Lichtwelle nach unten gedrängt. Welche Ausführungsform gewählt wird, hängt von den eingesetzten Materialien und den Einbaubedingungen ab.

Weiterhin sind Kombinationen des Feldweitentransformators nach der  
10 Erfindung mit einem weiteren Feldweitentransformator zur Ankopplung an einen photonischen Schaltkreis oder mit einem identischen Feldweitentransformator nach der Erfindung zur Ankopplung an einen weiteren Defektwellenleiter eines weiteren photonischen Kristalls möglich. Zum Anschluss von nicht-integrierten Komponenten kann der Feldweitentransformator auch direkt  
15 am Ende seines Taperbereiches eine Stoßstelle aufweisen. Dort kann auch ein Abschnitt eines integriert-optischen Wellenleiters vorgesehen sein, in dem zum Anschluss eines mehrmodig arbeitenden Bauelements die Bedingung der Monomodigkeit aufgegeben worden ist und sich mehrere Moden parallel ausbreiten können.

20

In den vorhergehenden Figuren wurden Adapter mit zwei Schnittstellen gezeigt. In der **Figur 5** ist ein multipler Adapter 40 mit drei Schnittstellen in monolithisch integrierter Bauform dargestellt, mit dessen Hilfe ein optisches Netzwerk 41 aus mehreren photonischen Kristallen 42, 43, 44 als Bauelementinseln hergestellt werden kann. Die Kopplung zu deren Defektwellenleitern 45, 46, 47 erfolgt über mehrere Feldweitentransformatoren 1, 48, 49 nach der Erfindung (in der Figur angedeutet durch ein Symbol mit einer doppelten, gegenläufigen Taperung), die über einen Rippenwellenleiter 9 in Y-Form verbunden sind und unterschiedliche, jeweils an den zu koppelnden  
25 photonischen Kristalle 42, 43, 44 angepasste Dimensionierungen aufweisen können. Dargestellt ist eine 3dB-Aufteilung der Pfade im Y, andere Auftei-

30

lungen, insbesondere mit einer leistungserhaltenden Kopplungsanordnung, sind möglich. Vorteil einer solchen Anordnung ist ihr geringer Platzbedarf und die gute Integration der sehr kleinen photonischen Kristalle. Ein derartiger monolithisch integrierter Adapter mit mehreren Ausgangsschnittstellen ist auch  
5 zur Ankopplung von mehreren Glasfasern, integriert-optischen Komponenten oder anderen optischen Bauelementen zur Ankopplung an einen oder mehrere Defektwellenleiter photonischer Kristalle ausbildbar.

In den **Figuren 6, 7 und 8** ist ein paralleler Einsatz von mehreren Feldweiten-  
10 transformatoren nach der Erfindung gezeigt, die an mehrere Defektwellenleiter monolithisch integriert angekoppelt sind. In der **Figur 6** sind in den photonischen Kristalle **50** vier parallele Defektwellenleiter **51** integriert. Jeder Defektwellenleiter **51** ist über einen Feldweitentransformator **52** nach der Erfindung mit einem integriert-optischen Wellenleiter **53** mit einem  
15 optoelektronischen Bauelement **54...57** verbunden. Hierbei kann es sich beispielsweise um Laser- oder Photodioden handeln. Der photonische Kristall **60** in der **Figur 7** zeigt einen Defektwellenleiter **61**, der sich über eine integrierte Y-Weiche als 3dB-Koppler in zwei Defektwellenleiter **62, 63** aufteilt. Diese sind über zwei Feldweitentransformatoren **64, 65** mit zwei integriert  
20 optischen Wellenleitern **66, 67** verbunden, die zu zwei monolithisch integrierten optoelektronischen Bauelementen **68, 69** führen. In der **Figur 8** schließlich zeigt ein photonischer Kristall **70** einen Defektwellenleiter **71**, der die Lichtsignale wellenlängenabhängig über eine integrierte wellenlängenselektive Weiche, die als bidirektionales Bauelement auch als wellenlängenselektiver  
25 Vereiniger arbeiten kann, auf zwei Defektwellenleiter **72, 73** leitet. Diese sind dann wiederum mit zwei Feldweitentransformatoren **74, 75** nach der Erfindung über zwei integriert optische Wellenleiter **76, 77** mit zwei monolithisch integrierten optoelektronischen Bauelementen **78, 79** verbunden.

**Bezugszeichenliste**

	<b>1</b>	Feldweitentransformator nach der Erfindung
5	<b>2</b>	photonischer Kristall
	<b>3</b>	integriert-optischer Wellenleiter
	<b>4</b>	Wellenleiterschicht
	<b>5</b>	obere Pufferschicht
	<b>6</b>	untere Pufferschicht
10	<b>7</b>	Leitschicht
	<b>8</b>	Substrat
	<b>9</b>	Rippenwellenleiter
	<b>10</b>	periodische Lochanordnung
	<b>11</b>	bohrungsartige Tiefenätzung
15	<b>12</b>	Defektwellenleiter
	<b>13</b>	Taperbereich
	<b>14</b>	vertikale Taperung
	<b>15</b>	laterale Taperung
	<b>16</b>	Rippe
20	<b>20</b>	dualer Adapter
	<b>21</b>	optische Glasfaser
	<b>22</b>	weiterer Feldweitentransformator
	<b>23</b>	Rippenwellenleiter
	<b>30</b>	dualer Adapter
25	<b>31</b>	optische Glasfaser
	<b>32</b>	weiterer Feldweitentransformator
	<b>33</b>	Rippenwellenleiter
	<b>40</b>	multipler Adapter
	<b>41</b>	optisches Netzwerk
30	<b>42, 43, 44</b>	photonischer Kristall
	<b>45, 46, 47</b>	Defektwellenleiter

	<b>48, 49</b>	Feldweitentransformator nach der Erfindung
	<b>50</b>	photonischer Kristall
	<b>51</b>	Defektwellenleiter
	<b>52</b>	Feldweitentransformator nach der Erfindung
5	<b>53</b>	integriert-optischer Wellenleiter
	<b>54...57</b>	optoelektronisches Bauelement
	<b>60</b>	photonischer Kristall
	<b>61, 62, 63</b>	Defektwellenleiter
	<b>64, 65</b>	Feldweitentransformator nach der Erfindung
10	<b>66, 67</b>	integriert-optischer Wellenleiter
	<b>68, 69</b>	optoelektronisches Bauelement
	<b>70</b>	photonischer Kristall
	<b>71, 72, 73</b>	Defektwellenleiter
	<b>74, 75</b>	Feldweitentransformator nach der Erfindung
15	<b>76, 77</b>	integriert-optischer Wellenleiter
	<b>78, 79</b>	optoelektronisches Bauelement
	<b>B</b>	Wellenleiterbreite
	<b>H</b>	Wellenleiterhöhe
20	<b>TE</b>	vertikale Modenkomponente
	<b>TM</b>	horizontale Modenkomponente

## Patentansprüche

1. Integriert-optischer Feldweitentransformator (1) zur adiabatischen, monomodi-  
5 gen Feldanpassung zwischen einer optischen Komponente und einem einer  
planaren Wellenleiterschaltung zugehörigen integriert-optischen Wellenleiter  
(3), der in einem Taperbereich (13) eine kontinuierliche, bis zumindest auf die  
Pufferschicht (5) zwischen Wellenleiterschicht (4) und Leitschicht (7)  
verlaufende vertikale Taperung (14) der Wellenleiterhöhe (H) aufweist,  
10 **dadurch gekennzeichnet, dass**  
die optische Komponente ein photonischer Kristall (2) mit zumindest einem in  
einer periodischen Lochanordnung (10) erzeugten Defektwellenleiter (12) ist,  
von dem sich die vertikale Taperung (14) in Richtung auf den integriert-  
optischen Wellenleiter (3) erstreckt, und dass der integriert-optische  
15 Wellenleiter (3) eine zur vertikalen Taperung (14) der Wellenleiterhöhe (H)  
kontinuierlich gegenläufige laterale Taperung (15) der Wellenleiterbreite (B)  
aufweist, wobei beide Taperungen (14, 15) in ihrem Verhältnis von Höhe zu  
Breite unter Anwendung eines zweidimensionalen numerischen Verfahrens zur  
Eigenmodenberechnung für eine Erzielung von Monomodigkeit im gesamten  
20 Taperbereich (13) und für eine zumindest vertikale Übereinstimmung der Feld-  
schwerpunkte dimensioniert sind.

2. Integriert-optischer Feldweitentransformator nach Anspruch 1,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**  
25 die vertikale Taperung (14) der Wellenleiterhöhe (H) bis in die Pufferschicht (5)  
hineinreicht.

3. Integriert-optischer Feldweitentransformator nach Anspruch 1 oder 2,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**  
30 die vertikale und die laterale Taperung des integriert-optischen Wellenleiters  
mit sich ändernden Neigungen verlaufen.

4. Integriert-optischer Feldweitentransformator nach einem der Ansprüche 1 bis 3,

**dadurch gekennzeichnet, dass**

- 5 der integriert-optische Wellenleiter (3) ein Rippenwellenleiter (9) ist, der die vertikale und laterale Taperung (14, 15) im Bereich seiner Rippe (16) aufweist.

5. Integriert-optischer Feldweitentransformator nach einem der Ansprüche 1 bis 4,

- 10 **dadurch gekennzeichnet, dass**

der integriert-optische Wellenleiter (3) mit zumindest einem weiteren integriert-optischen Wellenleiter (9) eines weiteren Feldweitentransformators (22; 32; 48, 49) monolithisch integriert verbunden ist.

- 15 6. Integriert-optischer Feldweitentransformator nach Anspruch 5,

**dadurch gekennzeichnet, dass**

der zumindest eine weitere Feldweitentransformator (48, 49) zur Feldanpassung an einen weiteren Defektwellenleiter (46, 47) in einem photonischen Kristall (43, 44) ausgebildet ist.

20

7. Integriert-optischer Feldweitentransformator nach Anspruch 5,

**dadurch gekennzeichnet, dass**

der zumindest eine weitere Feldweitentransformator (22; 32) zur Feldanpassung an eine monomodige optische Glasfaser (21; 31) ausgebildet ist.

25

8. Integriert-optischer Feldweitentransformator nach Anspruch 5,

**dadurch gekennzeichnet, dass**

der zumindest eine weitere Feldweitentransformator zur Feldanpassung an einen photonischen Schaltkreis ausgebildet ist.

30



9. Integriert-optischer Feldweitentransformator nach einem der Ansprüche 1 bis 4,

**dadurch gekennzeichnet, dass**

der integriert-optische Wellenleiter eine Schnittstelle zur Stoßkopplung mit  
5 einer weiteren optischen Komponente, insbesondere eines optischen Boards, aufweist.

10. Integriert-optischer Feldweitentransformator nach einem der Ansprüche 1 bis 9,

10 **dadurch gekennzeichnet, dass**

der integriert-optische Wellenleiter im Anschluss an den Taperbereich einen Auslaufbereich aufweist, in dem bei der geometrischen Dimensionierung die Bedingung der Monomodigkeit aufgegeben und Multimodigkeit zugelassen ist.

15 11. Integriert-optischer Feldweitentransformator nach einem der Ansprüche 1 bis 10,

**dadurch gekennzeichnet, dass**

dieser mit weiteren Feldtransformatoren (52; 64, 65; 74, 75) gleicher Bauart parallel an verschiedene Defektwellenleiter (51; 62, 63; 72, 73) eines  
20 photonischen Kristalls (50; 60; 70) monolithisch integriert angekoppelt ist.

12. Integriert-optischer Feldweitentransformator nach einem der Ansprüche 1 bis 11,

**dadurch gekennzeichnet, dass**

25 der monolithisch integrierte Schichtaufbau in einem höherbrechenden, insbesondere quaternären, III-V- Halbleiter-Verbindungsmaterial als Wellenleiter-schicht und einem dazu niederbrechenden, insbesondere binärem, III-V- Halbleiter-Verbindungsmaterial als optische Begrenzungsschicht ausgebildet ist.

13. Integriert-optischer Feldweitentransformator nach einem der Ansprüche 1 bis 12,

**dadurch gekennzeichnet, dass**

der monolithisch integrierte Schichtaufbau in einem höherbrechenden  
5 Halbleitermaterial, insbesondere Silizium, als Wellenleiterschicht und einem  
dazu niederbrechenden Halbleitermaterial, insbesondere  $\text{SiO}_x$ , als optische  
Begrenzungsschicht ausgebildet ist.

1/5

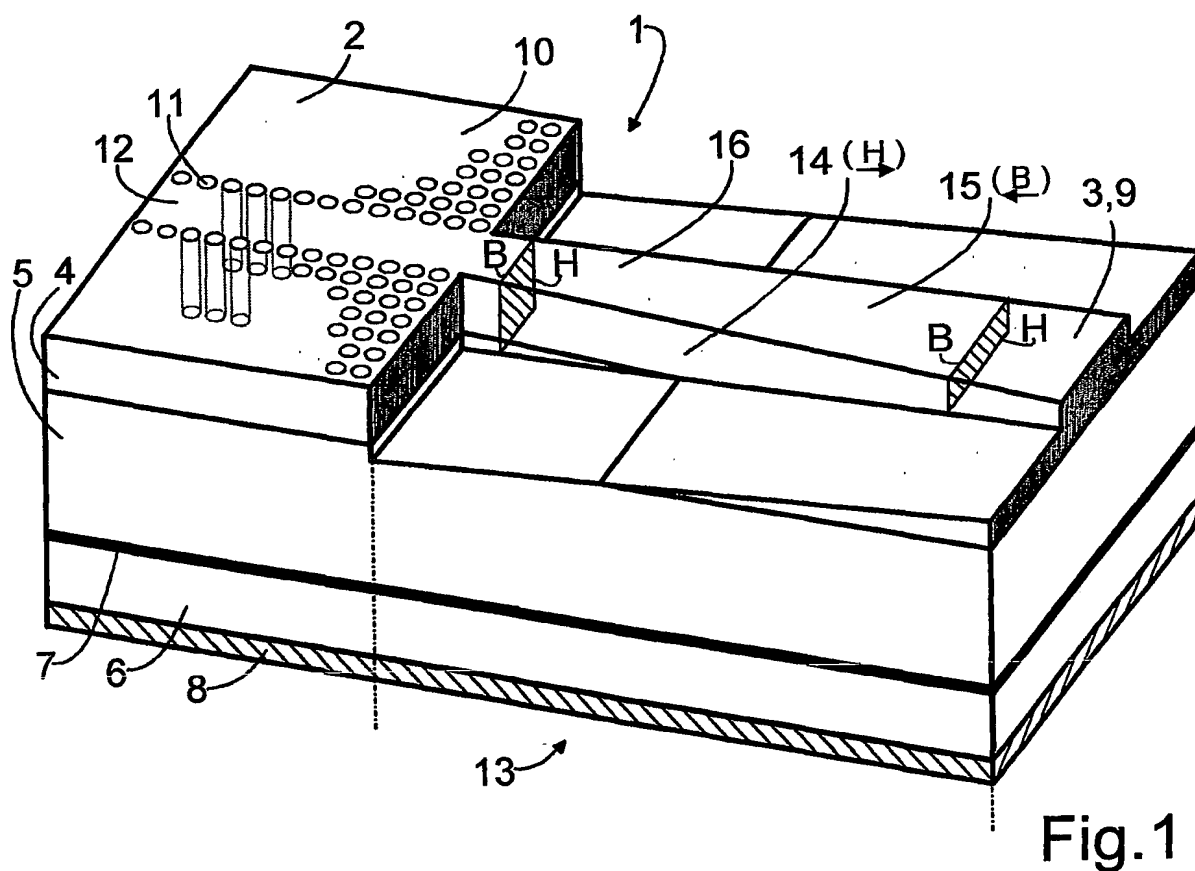
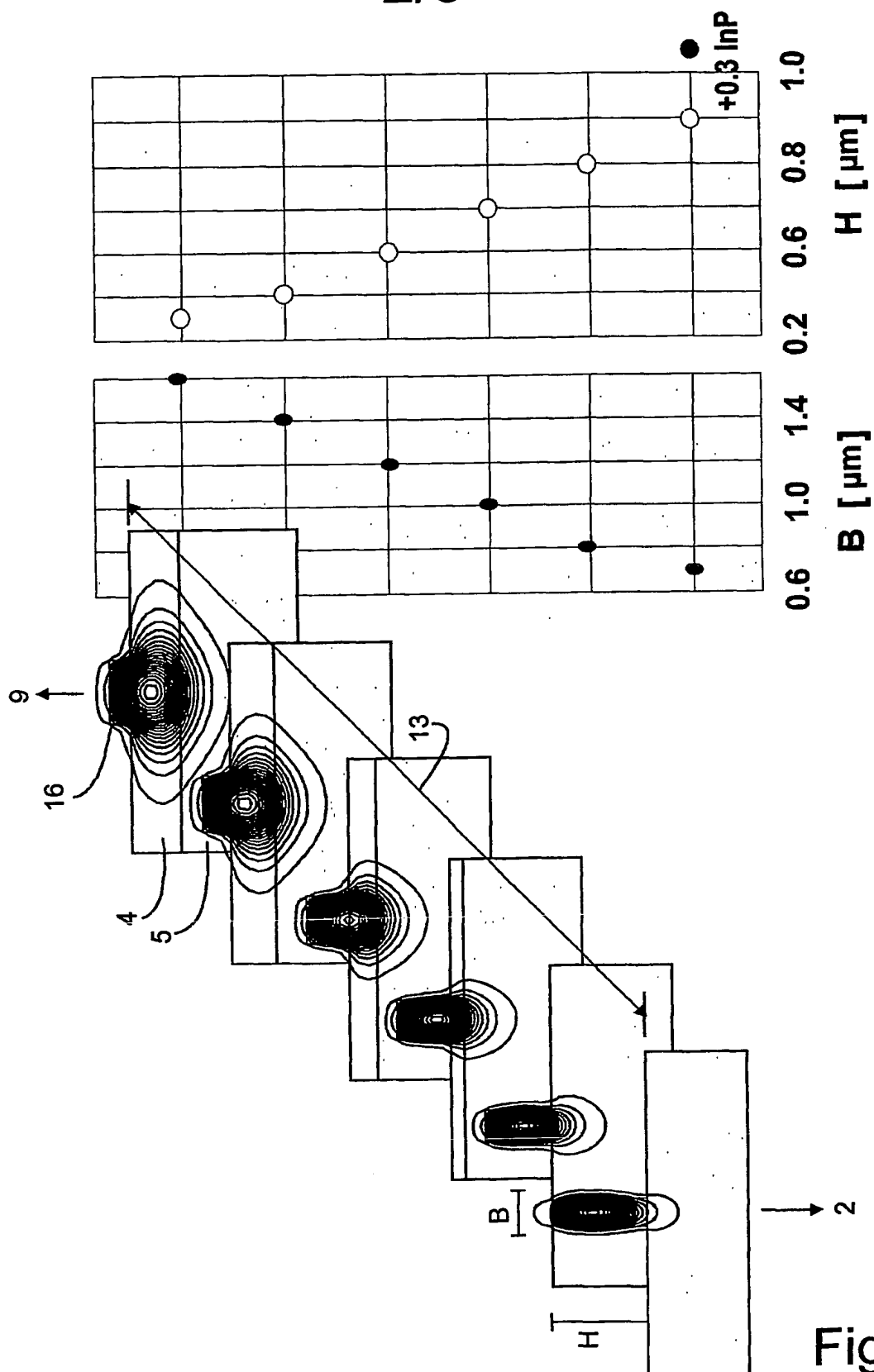


Fig.1

**2/5**



**Fig.2**

3/5

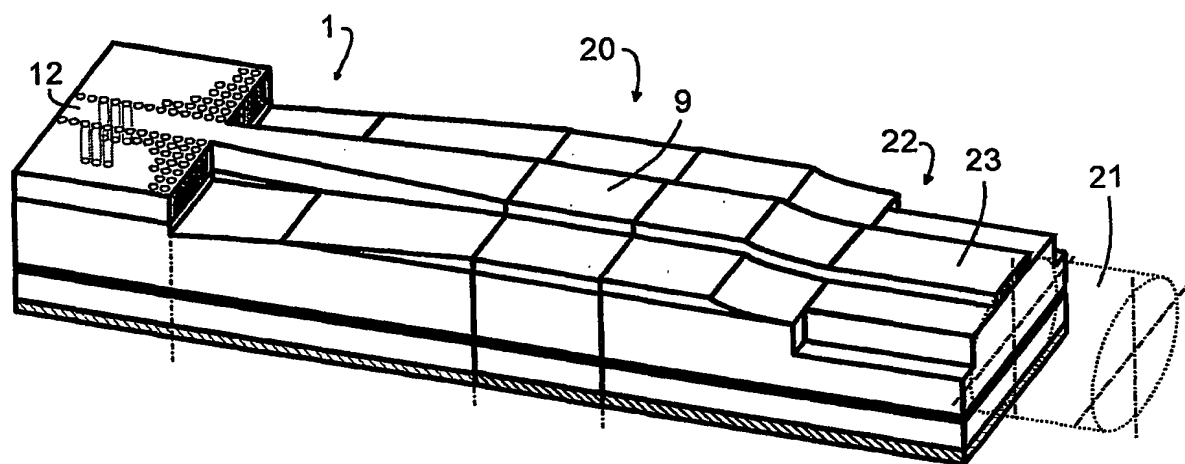


Fig.3

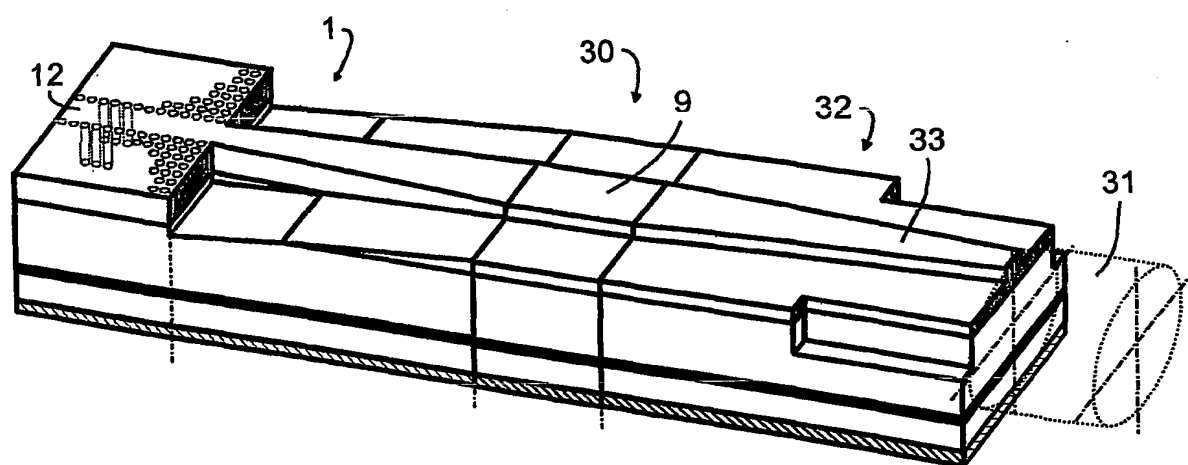


Fig.4

4/5

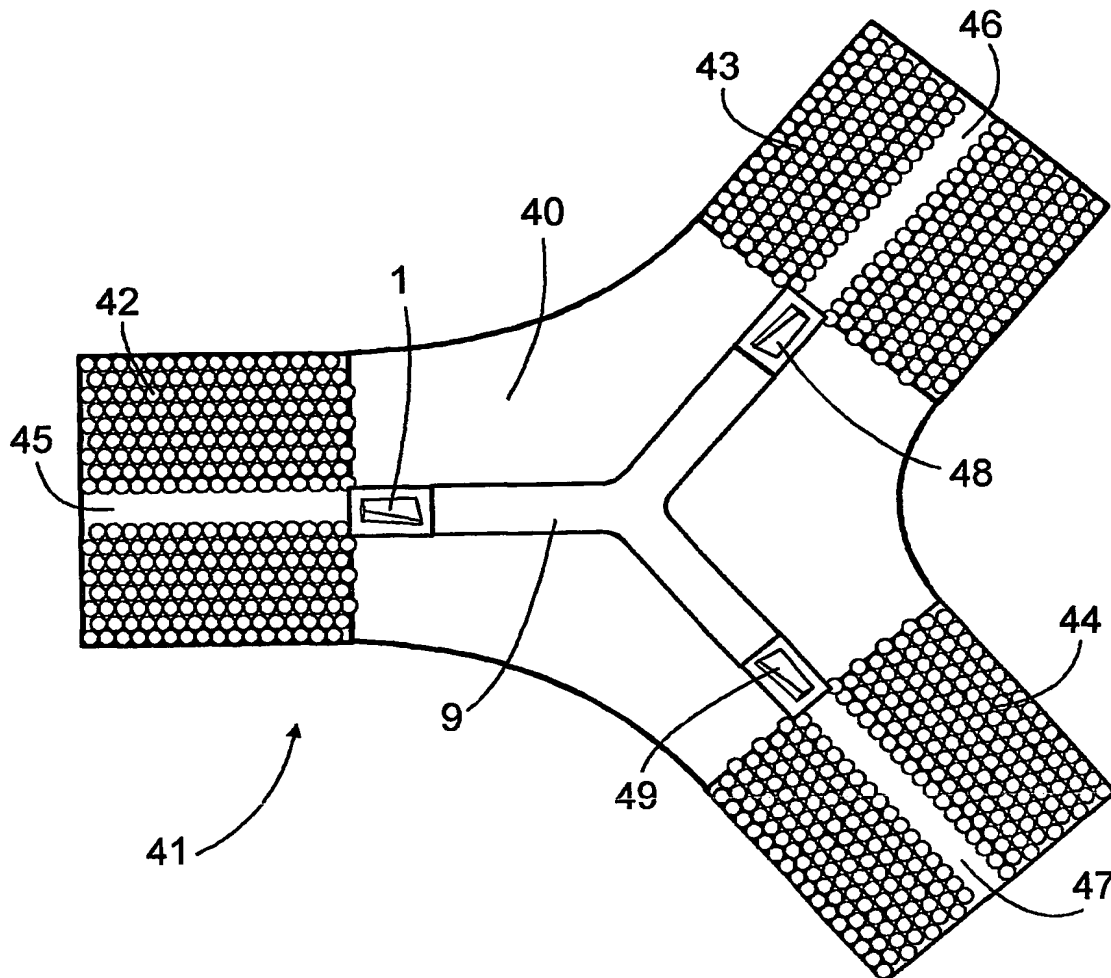
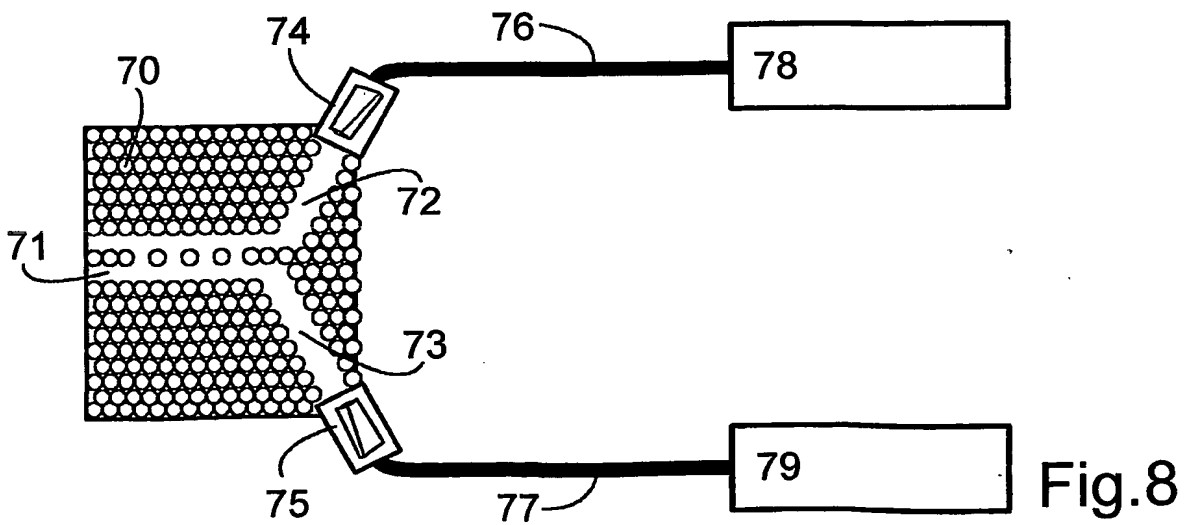
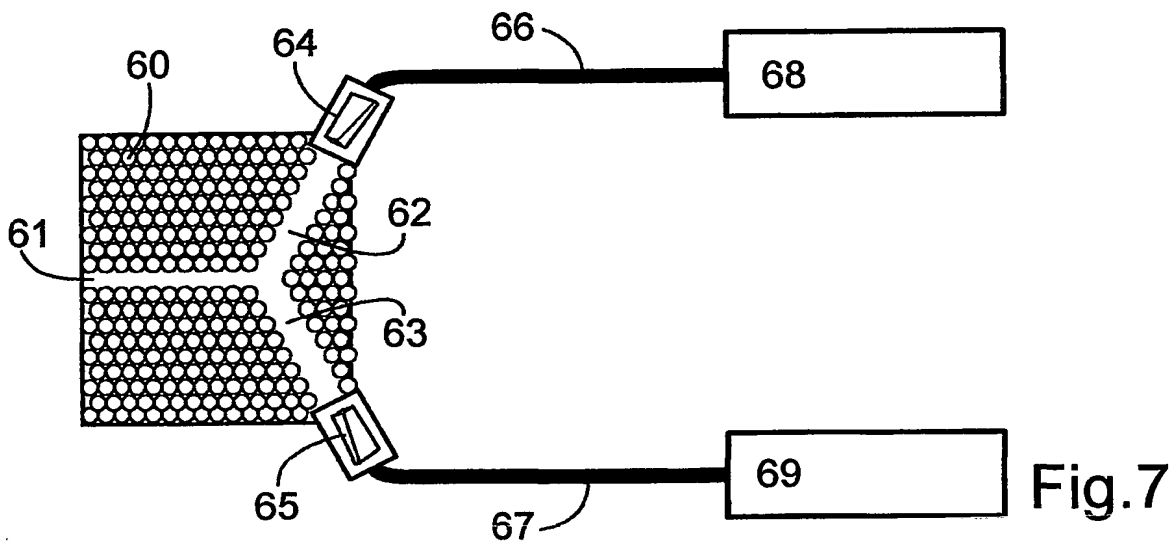
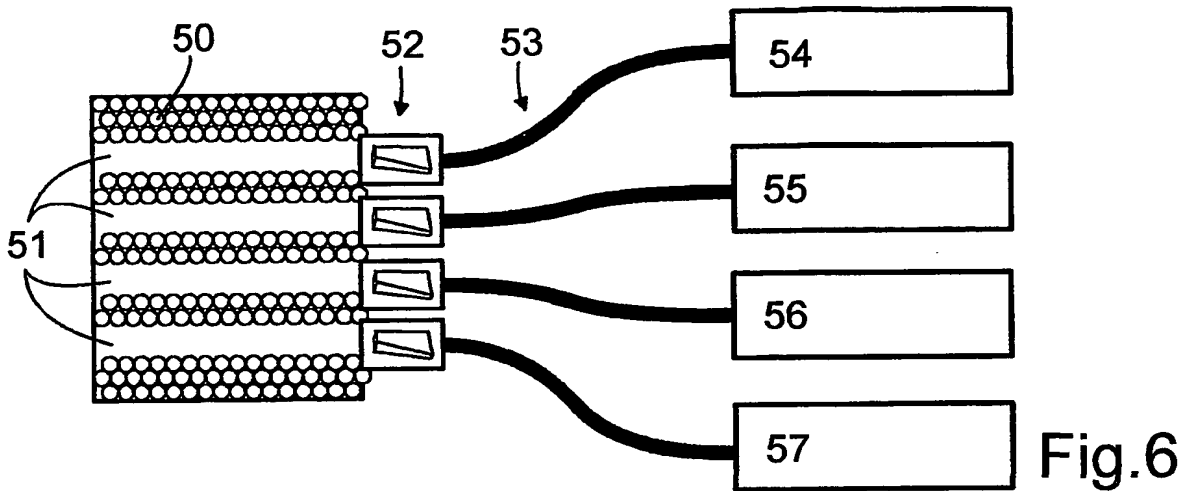


Fig.5

5/5



This Page is inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☒ COLORED OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☒ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REPERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images  
problems checked, please do not report the  
problems to the IFW Image Problem Mailbox**